

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Angin

Energi angin merupakan salah satu potensi energi terbarukan yang dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap kebutuhan energi listrik domestik. Pembangkit energi angin yang biasa disebut Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) ini bebas polusi dan sumber energinya yaitu angin tersedia di mana pun, maka pembangkit ini dapat menjawab masalah lingkungan hidup dan ketersediaan sumber energi.

Dengan rata-rata kecepatan angin yang rendah, generator yang dipasang harus dirancang untuk berputar secara optimal pada kecepatan angin yang rendah (yang kemungkinan terjadinya paling besar). Masalahnya, karena fluktuasi kecepatan angin di Indonesia cukup besar, kecepatan angin sering melonjak tinggi selama beberapa saat. Jika kita merancang generator untuk berputar secara optimal pada kecepatan angin rendah, generator tidak akan kuat menahan kecepatan angin yang tinggi. Akibatnya generator akan rusak.

Maka dari itu, biasanya turbin angin yang dipasang di Indonesia tidak dirancang untuk berputar secara optimal pada kecepatan rendah yang kemungkinan terjadinya paling besar tersebut. Biasanya turbin angin yang dipasang di Indonesia dirancang untuk berputar secara optimal pada kecepatan angin yang sedikit lebih tinggi daripada kecepatan rendah yang dimaksud tadi.

Namun solusi ini menghadapi masalah baru yaitu turbin tidak akan berputar dengan baik pada kecepatan yang sangat rendah (yang sering terjadi juga karena besarnya fluktuasi). Akibatnya daya tidak terbangkitkan pada kecepatan rendah. Maka sistem turbin angin di Indonesia sering tidak menghasilkan daya (karena kecepatan sangat rendah cukup sering terjadi) [6].

2.2 Wind Model

Umumnya, kecepatan angin dipengaruhi oleh beberapa component seperti pada lingkungan dimana wind turbine dipasang, jumlah baling-baling yang akan digunakan dan ketinggian dari *tower*.

Secara umum persamaan *wind turbine* di jelaskan pada persamaan 2.1:

$$V_w(t) = \tilde{V}_w(t) + V_{ws}(t) + V_{ts}(t) + V_{tu}(t) \text{ [m/s]} \quad (2.1)$$

2.2.1 Wind Shear

Wind shear merupakan kejadian dimana angin tiba-tiba berubah arah. *Wind shear* dapat dihitung dari persamaan 2.2 berikut ini:

$$\begin{aligned} V_{ws}(t) &= \\ \frac{2V_{hub}(t)}{3qR^2} \sum_{i=1}^3 \int_{r_0}^R &\left(\frac{R^2}{h} \cos(\varphi_i(t)) \frac{R^3(\alpha-1)}{2h^2} \cos^2(\varphi_i(t)) \frac{R^4(\alpha-1)(\alpha-2)}{6h^3} \cos^3(\varphi_i(t)) \right) \\ V_{ws}(t) &= \\ \frac{2V_{hub}(t)}{3qR^2} \sum_{i=1}^3 &\left(\frac{R^3\alpha}{3h} \cos(\varphi_i(t)) \frac{R^4(\alpha-1)}{8h^2} \cos^2(\varphi_i(t)) \frac{R^5(\alpha-1)(\alpha-2)}{30h^3} \cos^3(\varphi_i(t)) \right) - \\ &\left(\frac{r_0^3\alpha}{3h} \cos(\varphi_i(t)) + \frac{r_0^4(\alpha-1)}{8h^2} \cos^2(\varphi_i(t)) + \frac{r_0^5(\alpha-1)(\alpha-2)}{30h^3} \cos^3(\varphi_i(t)) \right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$q \triangleq 1 - \left(\frac{r_0}{R} \right)^2$$

2.2.2 Tower Shadow

Tower shadow merupakan kejadian dimana saat *blade* berada didepan *tower* dan *tower* dapat menyebabkan menghalangi *blade* untuk menangkap angin secara maksimal. komponent *tower shadow* dihitung dari mulai ujung *blade* dengan menjumlahkan ketiga *blade*. Persamaan *tower shadow* seperti persamaan 2.3 berikut ini :

$$\begin{aligned} V_{ts}(t) &= \frac{2mV_{hub}(t)}{3qR^2} \sum_{i=1}^3 \int_{r_0}^R \left(\frac{m\alpha^2(r^3 \sin^2(\varphi_i(t)) - rk^3)}{(r^2 \sin^2(\varphi_i(t)) + k^2)^2} \right) dr \\ &= \frac{2mV_{hub}(t)}{3qR^2} \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\alpha^3 \ln(R^2 \sin^2(\varphi_i(t)) + k^2)}{2 \sin^2 \varphi_i(t)} - \frac{\alpha^2 \ln(r_0^2 \sin^2(\varphi_i(t)) + k^2)}{2 \sin^2 \varphi_i(t)} + \right. \\ &\quad \left. \frac{\alpha^2 k^2}{\sin^2 \varphi_i(t) (R^2 \sin^2(\varphi_i(t)) + k^2)} - \frac{\alpha^2 k^2}{\sin^2 \varphi_i(t) (r_0^2 \sin^2(\varphi_i(t)) + k^2)} \right) \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$m \triangleq \frac{\alpha(\alpha-1)R^2}{8h^2}$$

2.2.3 Model Aerodynamic System

Model *aerodynamic* diasumsikan bahwa angin yang melewati seluruh bagian rotor memiliki kecepatan yang sama, oleh karena itu model *aerodynamic* dimodifikasi untuk memperhitungkan kecepatan angin yang akan digunakan. *Pitch system* adalah bagian awal dimana sudut *pitch* akan di atur sedemikian rupa untuk dapat menangkap angin dari berbagai arah, kemudian angin akan memutar baling - baling.. *Aerodynamic* dari *wind model* di modelkan sebagai torsi yang bekerja di blade. *Aerodynamic* di modelkan sebagai persamaan 2.4 berikut :

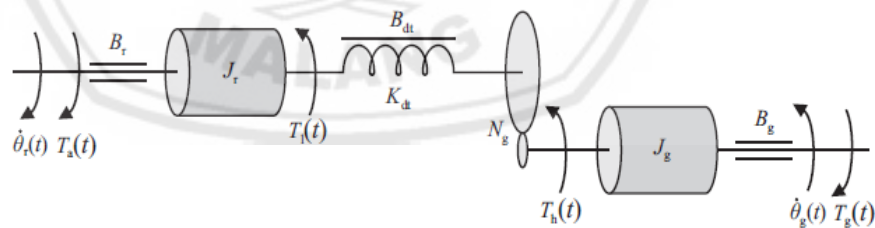
$$\tau_r(t) = \frac{\rho \pi R^3 C_q(\alpha(t), \beta(t)) v_w(t)^2}{2} \quad (2.4)$$

Persamaan sudut pitch didapat dari persamaan 2.5 berikut ini :

$$\frac{\beta(s)}{\beta_r(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2} \quad (2.5)$$

2.2.4 Model Drive Train

Drive train adalah bagian untuk meningkatkan kecepatan rotor untuk mencapai kecepatan yang diinginkan. Bagian dari *drive train* dapat dibagi menjadi beberapa bagian seperti *low shaft*, *high shaft*, *gear* dan pegas torsi. Hubungan antar bagian digambarkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Drive Train Model

Inersia pada *low speed shaft* juga termasuk pada inersia di rotor, dinamika perubahan inersia low speed shaft seperti berikut ini :

$$J_g \ddot{\theta}_g = T_h(t) - T_g(t) - B_g \dot{\theta}_g \quad (2.6)$$

Bagian yang tersisa dari *gearbox* untuk menentukan rasio *gearbox* termasuk untuk menghitung kerugian pada *drivetrain*, seperti didefinisikan pada persamaan 2.7 dan 2.8:

$$\theta_g(t) = N_g \theta_r(t) \text{ [rad]} \quad (2.7)$$

$$T_h(t) = \eta_{dt} \frac{T_1}{N_g} \text{ [Nm]} \quad (2.8)$$

Dengan pengecualian torsi sudut, sudut tidak berpengaruh pada pemodelan *drivetrain*. Oleh karena itu omega digantikan dengan sudut teta yang akan digunakan dalam persamaan selanjutnya, yang disubstitusikan seperti persamaan 2.9 :

$$T_1(t) = K_{dt} \theta_{\Delta}(t) + B_{dt} (\omega_r(t) - \frac{\omega_g(t)}{N_g}) \quad (2.9)$$

Dari persamaan sebelumnya dapat digunakan dalam pemodelan *drive train* secara menyeluruh, dan untuk mendeskripsikan model dari drive train dapat dimodelkan menggunakan turunan dari persamaan model *drivetrain* seperti persamaan 2.10 sampai 2.12 berikut ini.

$$J_r \dot{\omega}_r(t) = T_a(t) - K_{dt} \theta_{\Delta}(t) - (B_{dt} B_r) \omega_r(t) \frac{B_{dt}}{N_g} \omega_g(t) \quad (2.10)$$

$$J_g \dot{\omega}_g(t) = \frac{K_{dt}}{N_g} \theta_{\Delta}(t) + \frac{B_{dt}}{N_g} \omega_r - (\frac{B_{dt}}{N_g^2} + B_g) \omega_g(t) T_g(t) \quad (2.11)$$

$$\dot{\theta}_{\Delta}(t) = \omega_r(t) - \frac{1}{N_g} \omega_g(t) \quad (2.12)$$

2.2.5 Model Generator

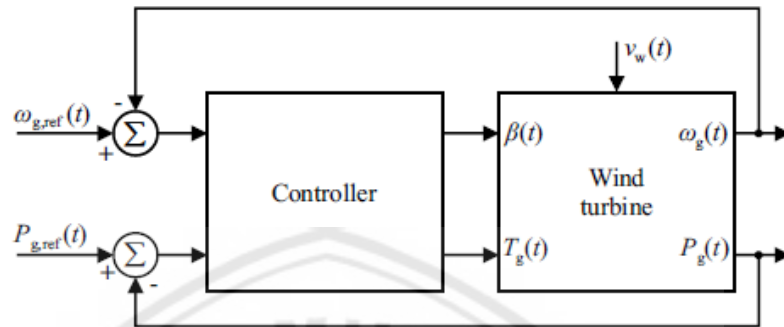
Generator adalah bagian yang digunakan untuk megubah dari gaya gerak menjadi energi listrik. Berikut ini adalah pemodelan daya yang dihasilkan oleh generator dengan penyederhanaan yang dimodelkan dengan orde satu seperti persamaan 2.13:

$$P_g(t) = \eta_g \omega_g(t) \tau_g(t) \quad (2.13)$$

2.2.6 Full Load Controller

Pada pengoperasian *full load controller* digunakan untuk menjaga kecepatan rotor dan mengatur sudut *pitch*. Torsi generator beroperasi ketika kecepatan angin tidak melebihi dari nilai kecepatan angin maksimal. Torsi kontrol

memastikan bahwa generator berjalan pada kecepatan hingga mencapai *tip ratio* maksimal. *Tip ratio* adalah rasio antara kecepatan dan kecepatan angin. Sudut pitch diatur untuk mendapatkan angin dari berbagai arah. Pemodelan *full load* control digambarkan pada gambar 2.2 [7].



Gambar 2.2 Pemodelan Kontroller

2.3 Fault Tolerance Control

Dalam suatu sistem kontrol, dibutuhkan suatu peningkatan performa dan keamanan yang cukup tinggi. Desain *feedback* control ditemukan pada sistem ketika penggunaan perbedaan sinyal, yang ditentukan dengan cara membandingkan harga actual dari variable sistem terhadap harga yang diinginkan. dapat mengakibatkan kinerja tidak memuaskan terkadang sebagai akibat terjadinya kesalahan pada aktuator, sensor ataupun komponen yang lainnya. Untuk mengatasi kesalahan tersebut, diperlukan desain kontrol yang mentolerir kerusakan yang terjadi dengan tetap menjaga stabilitas sistem yang diinginkan. Secara umum *fault tolerant control* adalah suatu sistem kontrol yang mampu mengatasi terjadinya kegagalan komponen secara otomatis dengan menjaga stabilitas sistem dan kinerja yang dapat diterima dalam suatu kegagalan.

Fault tolerant control systems (FTCS) dapat dibagi menjadi dua tipe yaitu *pasif fault tolerant control systems (PFTCS)* dan *active fault tolerant control systems (AFTCS)*. *pasif fault tolerant control system* merupakan suatu kontroler tetap yang dirancang dengan kuat untuk mempertahankan sistem dari gangguan yang terjadi pada aktuator ataupun sensor yang biasa disebut dengan *robust control system*. *PFTCS* dapat mengontrol system tanpa rekonfigurasi kesalahan.

Berbeda dengan *Active fault tolerant control systems* yang bersifat reaksi terhadap suatu kesalahan komponen dengan mengkonfigurasi ulang aksi kontrol sehingga kestabilan dan kinerja pada system dapat dijaga. *Active fault tolerant control* terdiri atas 2 sub system yaitu, *fault detection and identification* dan mekanisme *reconfiguration controller*. Yang utama dari *active fault tolerant control* adalah merancang kontroler yang mudah direkonfigurasi, kemudian dibuat skema *fault detection and identification* yang sensitif terhadap kegagalan pada sensor ataupun aktuator dan sensitif terhadap gangguan eksternal serta memiliki mekanisme rekonfigurasi control yang mengarah pada kinerja kegagalan system [8].

2.4 *Sliding Mode Observer*

Sliding mode observer digunakan untuk mendeteksi kesalahan dan mengisolasinya, dimana aktuator atau sensor akan direkonstruksi menggunakan injeksi sinyal output yang setara. *Sliding mode observer* memiliki sifat unik, karena kemampuan untuk menghasilkan *sliding motion* pada kesalahan diantara hasil keluaran plant dan keluaran *observer*. Fungsi utama dari sliding mode observer adalah untuk mendeteksi kesalahan dan menemukan lokasi terjadinya sehingga dapat dilakukan penanganan yang tepat untuk mengatasi kesalahan tersebut. Tahapan *observer* dilakukan dalam dua tahap, pertama adalah membangkitkan perbedaan sinyal antara sinyal actual dan sinyal yang diestimasi atau diprediksi oleh system. Tahap kedua adalah isolasi kesalahan menggunakan perbedaan sinyal yang diperoleh. Kemudian tahapan selanjutnya adalah pemberian injeksi gain, gain dipilih untuk menjaga kestabilan ketika terjadinya error dan gain juga dapat digunakan mengurangi efek gangguan. Persamaan 2.14 adalah persamaan *Sliding Mode Observer* [9].

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{L}(\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y}) + \mathbf{G}(\mathbf{v}) \quad (2.14)$$

2.5 **PID Kontroller**

Kontroller PID merupakan kontroller untuk menentukan presisi suatu system dengan karakteristik adanya feedback pada system tersebut. System PID terdiri dari tiga buah cara pengaturan yaitu control P (*proposional*), D (*derivative*)

dan I(*integral*). Dalam implementasinya masing masing cara dapat bekerja sendiri maupun digabungkan.

2.5.1 Kontroller P

Penggunaan controller P memiliki berbagai keterbatasan karena sifat control yang tidak dinamik. Controller P ini mampu untuk memperbaiki respon *rise time* dan *settling time*.

2.5.2 Kontroller I

Kontrol I dapat memperbaiki sekaligus menghilangkan respon *steady state*, namun pemilihan konstanta I yang tidak tepat dapat menyebabkan ketidakstabilan system. Pemilihan konstanta I yang tinggi justru dapat menyebabkan output berosilasi.

2.5.3 Kontroller D

Kontroller D dapat digunakan untuk memperbaiki respon *transien* dengan memprediksi *error* yang terjadi. Control D dapat meningkatkan stabilitas sistem dan mengurangi *overshoot* [10].

2.6 Teknik Observer

Observer nonlinier dikonstruksi berdasarkan prinsip struktur *Observer Luenberger* untuk sifat tidak memuaskan dan memperkirakan keadaan secara akurat. *Observer nonlinear* menunjukkan sifat *konvergensi* yang lebih baik. Namun demikian, metode desain *observer nonlinier* dibatasi untuk kriteria lingkaran. *Observer nonlinier* dirancang dengan gain yang bergantung pada *state* yang dihitung dari solusi parsial tunggal persamaan *diferensial*. Persamaan observer Luenberger pada persamaan 2.15 dan 2.16:

$$\dot{x} = Ax + Bu + \phi(u, x) \quad (2.15)$$

$$y = Cx \quad (2.16)$$

dimana state x adalah state *controllable*, adalah state input, y adalah state output dan $\phi(u, x)$ adalah *mapping nonlinier*. $\phi(u, x)$ diasumsikan *Lipschitz* di x dengan *Lipschitz* konstant γ . Dengan syarat $\|\phi(u, x) - \phi(u, \hat{x})\| \leq \gamma \|x - \hat{x}\|$.

LMI (*Linier Matrix Inequality*) pada *Sliding Mode Observer* di desain untuk system linier yang dapat diopersikan pada bagian *feedback* yang terjadi kesalahan. LMI diaktifkan untuk menolak gangguan dan ketidaksesuaian antara

sistem dan *observer*. Metode ini memerlukan manipulasi simbol untuk memecahkan masalah. Metode ini menggunakan inputan dari kesalahan linier. LMI digunakan untuk menghitung gain dengan penambahan *linier error* injeksi persamaan sistem dapat dituliskan seperti persamaan 2.17 dan 2.18 :

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.17)$$

$$y = Cx \quad (2.18)$$

LMI adalah sebuah metode yang digunakan untuk mencari nilai x sedemikian hingga $F(x) > 0$. Jika terdapat lebih dari satu LMI maka beberapa LMI tersebut dapat disederhanakan menjadi satu LMI saja seperti pertidaksamaan berikut ini:

$$\bar{F}(x) = \text{diag}([F^{(1)}(x) \dots F^{(p)}(x)]) < 0 \rightarrow \begin{cases} F^{(1)}(x) < 0 \\ F^{(p)}(x) < 0 \end{cases} \quad (2.20)$$

Oleh karena itu, penyelesaian beberapa LMI dapat disederhanakan menjadi satu $F(x) < 0$. [9]

2.7 Fungsi Lyapunov

Fungsi *Lyapunov* juga sebagai dasar dari banyak teori, fungsi *lyapunov* dapat digunakan untuk menganalisa kestabilan suatu system pada linier maupun non linier. Berdasarkan metode *Lyapunov*, sistem dapat dikatakan stabil *asymptotic* dalam pengertian *Lyapunov* jika memungkinkan untuk menemukan sebuah fungsi $V: R^n \rightarrow R$ yang mengikuti batasan :

Teorema 1 : $V(x = 0) = 0$;

Teorema 2 : $V(x) > 0, \forall x \neq 0$;

Teorema 2 : $\dot{V}(x) < 0, \forall x \neq 0$;

Kondisi untuk memenuhi batasan pada teorema adalah:

1. Selalu terpenuhi untuk $V(x)$ jika titik *equilibrium* system berada pada *origin* ($x = 0$), maka fungsi *Lyapunov* pada titik equilibrium adalah $0^T P 0 = 0, \forall P$.
2. Sistem global *asymptotic* apabila terdapat matriks P positif definit, atau dapat ditulis: $P > 0$.
3. Persamaan $V(x)$ dinyatakan sebagai berikut :

$$\dot{V}(x) = \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} = (Ax + Bu)^T P x + x^T P (Ax + Bu) \quad (2.21)$$

Dengan memilih $u=0$,maka analisa kestabilan sistem open-loop menjadi:

$$\dot{V}(x) = \dot{x}^T [A^T P + PA]x < 0 \quad (2.22)$$

Maka teorema 3 terpenuhi apabila memenuhi pertidaksamaan :

$$A^T P + PA < 0 \quad (2.23)$$

[11]

